

## Begriffe, Definitionen zur Thermodynamik

Die Thermodynamik beschreibt in der Physik die energetischen und stofflichen Zustände der Gase. Für die Darstellung des Wasserdampfes in Gasen werden die Größen:

- Druck als Dampfdruck der Gase oder absoluter Druck eines Systems
- Temperatur und
- Teilchenkonzentrationen

verwendet. Die einzelnen physikalischen Größen sind für die Beschreibung des Zustandes eines Gases im Zusammenhang zu betrachten. Der Wasserdampfgehalt eines Gases ist aus der allgemeinen Zustandsgleichung für Gase abgeleitet und lässt über die folgende Gleichung beschreiben:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \cdot \frac{1}{M}$$

p	- Gasdruck
V	- Gasvolumen
m	- Gasmasse
R	- Gaskonstante
T	- absolute Temperatur
M	- Molmasse

Für die Darstellung des Wasserdampfgehaltes in Gasen ergeben sich entsprechend der o.g. Gleichung verschiedenen Betrachtungsweisen:

- Beschreibung der Druckzustände des Wasserdampfes (z.B. Wasserdampfdruck, Sättigungsdruck)
- Angabe von Temperaturwerten (z.B. Taupunkttemperatur, Gastemperatur, Frostpunkttemperatur)
- Angabe von Teilchenkonzentrationen (z.B. absolute Feuchte)
- Verhältnisangaben (z.B. relative Gasfeuchte, ppm<sub>v</sub>).

Die verschiedenen Werte lassen sich ineinander umrechnen. Neben den definierten physikalischen Größen haben sich anwenderbezogen weitere Begriffe herausgebildet.

### Beschreibung des Wasserdampfdruckes in einem Gas

Der Gesamtdruck  $p$  eines Gasgemisches ergibt sich aus den Teildrücken der im Volumen vorhandenen Gaskomponenten:

$$p = p_w + p_{G1} + \dots + p_{GX}$$

$p_{G1}$	Druck der Gaskomponente 1
$p_{GX}$	Druck weiterer im Gas enthaltenen Komponenten

In der Thermodynamik hat sich für die Beschreibung des Wasserdampfdruckes das Formelzeichen  $e$  durchgesetzt:

$$e_w = p_w$$

Unter Normalbedingungen beträgt der atmosphärische Druck  $p = 1013,25$  hPa. Der in der Umgebungsluft enthaltene Wasserdampf bewirkt, je nach Witterungsbedingungen, einen Partialdruck von ca.  $e_w \sim (1 \dots 13)$  hPa. Für die Beschreibung der Druckverhältnisse in einem Gasgemisch werden verschiedene Begriffe definiert. Bei der Angabe der Konstanten und Gleichungen wird bezug auf die Veröffentlichungen von Sonntag genommen.

### Wasserdampfdruck (water vapour)

Formelzeichen:  $e_w$

Maßeinheit: hPa; mbar; Torr (veraltet); abgeleitete Einheiten

Definition:

Es ist der Partialdruck des Wassers in der gasförmigen Phase (Wasserdampf) in der Atmosphäre. Er ist Teil des barometrischen Gesamtdruckes. Der Wasserdampfdruck ist sehr stark temperaturabhängig.

**Wasserdampfsättigungsdruck** (saturated water vapour)Formelzeichen:  $e_{sw}$  Messung über Wasser $e_{si}$  Messung über Eis

Maßeinheit: hPa; mbar; Torr (veraltet); abgeleitete Einheiten

Definition:

Der Wasserdampfsättigungsdampfdruck ist der bei der jeweiligen Gastemperatur T maximal mögliche Wasserdampfdruck

Gleichung:

Sättigungsdampfdruck über Wasser:

$$e_{sw}(T) = 6,11213 \cdot \exp\left(\frac{17,5043 \cdot T}{241,2 + T}\right)$$

T = Lufttemperatur über Wasser

Sättigungsdampfdruck über Eis:

$$e_{si}(T) = 6,11153 \cdot \exp\left(\frac{22,4433 \cdot T}{272,186 + T}\right)$$

T = Lufttemperatur über Eis

**Die Beschreibung der Temperaturverhältnisse**

Die Gastemperatur bestimmt direkt das Wasserdampfaufnahmevermögen eines Gases. Die Angabe der Temperatur ist für die Beschreibung der Wasserdampfverhältnisse Grundvoraussetzung.

**Gastemperatur**, Umgebungstemperatur (temperature)

Formelzeichen: T

Maßeinheit: °C; K

Definition:

Gemessen wird die Temperatur eines Gases bzw. eine bestimmte Prozesstemperatur.

**Taupunkttemperatur** (dew point)Formelzeichen:  $T_d$ 

Maßeinheit: °C

Definition:

Es bezeichnet die Temperatur, bei der ein Gas die vollständige Sättigung durch Wasserdampf über einer Wasseroberfläche erreicht hat. Der Wasserdampfdruck  $e_w$  ist dann gleich dem Sättigungsdampfdruck  $e_{sw}$ . Wird dem Gas weiter Wasserdampf zugeführt oder die Gastemperatur gesenkt, so fällt dieser als Tau bzw. Niederschlag aus. In der Umkehrung bedeutet das, der Taupunkt bezeichnet die Temperatur, auf die ein Gas abgekühlt werden muss, damit Betauung stattfindet. Für den Normalluftdruck ergibt sich die Beziehung:

$$T_d = 241,2 \cdot \left[ 17,5043 \cdot \left( \ln \frac{e_w}{6,11213} \right)^{-1} - 1 \right]^{-1}$$

gültig für Gastemperaturen  $-30\text{ °C} < T < 70\text{ °C}$  und  $p = 1013,25\text{ hPa}$ **Frostpunkttemperatur**, Reifpunkt (frost point)Formelzeichen:  $T_f$ 

Maßeinheit: °C;

Definition:

Es bezeichnet die Temperatur bei der Luft über einer Eisoberfläche vollständig mit Wasserdampf gesättigt ist.

Gleichung:

$$T_f = 272,186 \cdot \left[ 22,4433 \cdot \left( \ln \frac{e_i}{6,11153} \right)^{-1} - 1 \right]^{-1}$$

gültig für Gastemperaturen  $-60\text{ °C} < T < 0\text{ °C}$  und  $p = 1013,25\text{ hPa}$  (2.1-10.)

Eine Umrechnung der Werte kann über Gleichungen oder Tabellen erfolgen.

### Psychrometergleichung

Der Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und dem Wasserdampfdruck lässt sich bei der psychrometrischen Messung darstellen. Als allgemeine Gleichung gilt die Formel nach Sprung:

$$e_w = e_{sw,si} - A \cdot p \cdot (T - T_w)$$

A - Psychrometerkonstante

### Psychrometrische Feuchttemperatur (wet-bulb temperature)

Formelzeichen:  $T_w, T'_w$

Maßeinheit: °C

Definition: Es ist die Temperatur, die an einem Psychrometer mit dem befeuchteten Thermometer gemessen wird. Sie spiegelt die abgegebene Verdunstungsenergie wider, die durch den Übergang von Wasser vom Thermometer in die vorbeiströmende Umgebungsluft abgegeben wird.

Gleichung zur Ermittlung des Wasserdampfdruckes aus der Feuchttemperatur nach Sonntag:

$$e_w = e_{sw} \left( \frac{T}{T_w} \right) - 0,650 \left( T - T_w \right) \cdot \left( 1 + 0,000944 \cdot T_w \right) \cdot \frac{p}{1006,6}$$

für  $T = -30$  bis  $70^\circ\text{C}$  und  $p = 1013,25$  hPa

Bei Temperaturen  $T < 0^\circ\text{C}$  und einem vereisten Thermometer muss mit anderen Konstanten gerechnet werden.

### Psychrometrische Trockentemperatur (dry-bulb temperature)

Formelzeichen: T

Maßeinheit: °C

Definition:

Es ist die Temperatur, die an einem Psychrometer mit dem trockenen Thermometer gemessen wird. Sie entspricht der Gas- bzw. Lufttemperatur.

### Psychrometrische Differenz

Formelzeichen:  $\Delta T$

Maßeinheit: K

Definition:

Es bezeichnet die Differenz zwischen der Trockentemperatur und der Feuchttemperatur eines Psychrometers:

$$\Delta T = T - T_w$$

### Stoffliche Darstellung, Verhältnisdarstellung und Konzentrationen

#### relative Gasfeuchte (relative humidity)

Formelzeichen: U

Maßeinheit: %r.F.

Definition:

Sie stellt das Verhältnis vom Sättigungsdampfdruck ( $e_{sw}$ ) zum herrschenden Wasserdampfdruck ( $e_w$ ) unter Berücksichtigung der Gastemperatur dar.

Gleichung:

$$U(T) = \frac{e_w}{e_{sw}} \cdot 100$$

Für Umgebungstemperaturen  $T < 0^\circ\text{C}$  muss wiederum eine Unterscheidung zwischen der Messung über Wasser bzw. über Eis vorgenommen werden.

#### absolute Feuchte, Wasserdampfdichte (absolute humidity)

Formelzeichen: a

Maßeinheit:  $\text{g}/\text{cm}^3$ , und daraus abgeleitete Größen

Definition:

Bezeichnet die Masse Wasserdampf, die in einem Gasvolumen enthalten ist.

Gleichung:

Ist das Verhältnis der im Gas (Luft) enthaltenen Wasserdampfmasse zum Gesamtgasvolumen.

$$a = \frac{m_w}{V_{wl}}$$

**Mischungsverhältnis**, Feuchtegrad (mixing ratio)Formelzeichen:  $r$ ,  $x$  (veraltet)

Maßeinheit: g/g; g/kg; daraus abgeleitete Größen; dimensionslos

Definition:

Als Mischungsverhältnis  $r$  eines feuchten Gases versteht man das Verhältnis der Masse des im Gasvolumen enthaltenen Wasserdampfes  $m_w$  zur Masse der trockenen Luft  $m_L$ . Die gleiche Beziehung lässt sich für das Volumen herstellen.

Massenverhältnisse

$$r_m = \frac{m_w}{m_L} \quad - \text{Masse der trockenen Luft}$$

**Massenverhältnis** (parts per million, parts per billion)Formelzeichen:  $f_m$ 

Maßeinheit: ppm; ppb; dimensionslos

Definition:

Das Verhältnis drückt den massebezogenen Anteil der Wassermoleküle an der Gesamtheit der im Gasvolumen enthaltenen Moleküle aus. Es ist ein Maß für die Massekonzentration (oder Volumenkonzentration) von Wasserdampf in einem Gasgemisch. In der Spurenfeuchtemesstechnik werden ppm - und ppb - Werte für die Bezeichnung des Wassergehaltes angegeben. Eine Umrechnung in andere Größen (Taupunkt, absolute Feuchte etc.) erfolgt über die genannten Gleichungen:

$$f_m = \frac{m_w}{m_w + m_L} \cdot 10^6$$

$$f_v = \frac{V_w}{V_w + V_L} \cdot 10^6$$

Beispiel:

1 ppb<sub>v</sub> = 10<sup>-9</sup> entspricht einer Konzentration von 1 mm<sup>3</sup> Wasserdampf zu 1 m<sup>3</sup> Luft.

**Mol** (mol)

Ein Mol ist die Stoffmenge eines Systems bestimmter Zusammensetzung, das aus ebensoviel Atomen besteht, wie Atome in 12 g des Nuklids <sup>12</sup>C enthalten sind. Es stellt die Molekularmasse eines Stoffes in g dar.

**Mollierdiagramm**; h,x-Diagramm, i,x-Diagramm (Mollier diagram)

Es drückt in grafischer Form den Zusammenhang für die Zustandsgrößen von Luft aus. In Abhängigkeit von Druck und Temperatur können z.B. die relative Feuchte, der Taupunkt, die Enthalpie usw. ermittelt werden.